

3

19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift  
11 DE 30 47 308 A 1

51 Int. Cl. 3:  
G 01 L 1/24  
G 01 D 5/26

21 Aktenzeichen: P 30 47 308.6  
22 Anmeldetag: 16. 12. 80  
43 Offenlegungstag: 17. 9. 81

31 Unionspriorität: 32 33 31  
21.12.79 US 106134

72 Erfinder:  
Hocker, G. Benjamin, 55343 Minnetonka, Minn., US

71 Anmelder:  
Honeywell Inc., Minneapolis, Minn., US

74 Vertreter:  
Rentzsch, H., Dipl.-Ing.; Herzbach, D., Dipl.-Ing., Pat.-Ass.,  
8050 Offenbach

DE 30 47 308 A 1

64 Akustisches bzw. druckempfindliches Sensorelement

DE 30 47 308 A 1



3047308

HONEYWELL INC.  
Honeywell Plaza  
Minneapolis, Minn., USA

5. Feb. 1980  
1008059 Ge  
Hz/umw

Akustisches bzw. druckempfindliches  
Sensorelement

Patentansprüche:

1. Akustisches bzw. druckempfindliches Sensorelement mit wenigstens einer Lichtleitfaser, g e k e n n z e i c h n e t d u r c h einen die Lichtleitfaser (11) umgebenden Block (12) aus einem Material mit einem gegenüber dem Elastizitätsmodul der Lichtleitfaser geringeren Elastizitätsmodul.
2. Sensorelement nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß die Lichtleitfaser (11) die Form einer Spirale aufweist.
3. Sensorelement nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß der Block (12) aus thermoplastischem Material besteht.
4. Sensorelement nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß der Block (12) aus wärmehärtbarem Material besteht.
5. Sensorelement nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß die Lichtleitfaser (11) aus Silikat erschmolzen ist.

130038/0736



3047308

-2-

6. Sensorelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Block (12) die Form eines Zylinders aufweist.
7. Sensorelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Block (12) die Form eines Zylinders mit hohlem Kern aufweist.

130038/0736

Die vorliegende Erfindung betrifft ein akustisches bzw. druckempfindliches Sensorelement nach dem Gattungsbegriff des Anspruchs 1.

In der Literatur sind verschiedene Formen von akustischen Sensoren beschrieben worden, bei denen durch Druckschwankungen hervorgerufene Änderungen der optischen Phase eines durch eine Lichtleitfaser übertragenen kohärenten Lichtstrahles ausgewertet werden. In diesem Zusammenhang sei beispielsweise auf die Veröffentlichungen von J.A.Bucaro und anderen verwiesen, die unter folgenden Titeln in folgenden Fachzeitschriften erschienen sind: "Optical Fiber Acoustic Sensors", Applied Optics 16, 1761, (1977); "Fiber Optic Hydrophone", J.Acoust. Soc. A., 62, No.5, 1302-4, Nov. 1977; und "Measurement of Sensitivity of Optical Fibers for Acoustic Detection", Applied Optics 18, 938 (1979). Ferner sei auf die US-PS 4 162 397 in diesem Zusammenhang verwiesen.

Die akustische Empfindlichkeit derartiger Einrichtungen ist der optischen Phasenänderung  $\Delta\phi$  proportional und umgekehrt proportional der Druckänderung  $\Delta P$  multipliziert mit der Lichtleitfaserlänge L. Für eine blanke Lichtleitfaser läßt sich diese akustische Empfindlichkeit durch folgenden Ausdruck angeben:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta PL} = - \frac{\beta(1-2\mu)}{E} + \frac{\beta n^2}{E} (1-2\mu) (2p_{12}+p_{11}) \quad (1)$$

In dieser Gleichung bedeutet:

$\beta$  = Lichtfortpflanzungsgeschwindigkeit in der Lichtleitfaser



- $E$  = Elastizitätsmodul des Lichtleitfaser-materials  
 $\mu$  = Poisson'sche Zahl für das Lichtleitfaser-material  
 $n$  = Brechungsindex des Lichtleitfasermaterials  
 $P_{11}, P_{12}$  = Dehnungsoptische Koeffizienten des Lichtleitfasermaterials

Die Werte  $E$ ,  $\mu$ ,  $P_{11}$  und  $P_{12}$  variieren für die meisten Glasmaterialien nicht zu sehr über einen großen Bereich. Für eine blanke erschmolzene Silikat-Lichtleitfaser wurde der Wert für  $\Delta\phi/\Delta\rho$  ungefähr zu  $2,6 \times 10^{-11} \times L$  ( $\lambda$  rad/Pa) gemessen und errechnet. Obgleich Sensoren mit Lichtleitfasern dieser Art sich als nützlich für akustische Messungen bei Unterwasseranwendungen erwiesen haben, ist deren Empfindlichkeit für die praktische Verwendung jedoch sehr gering.

Bei der dritten Veröffentlichung von Bucaro "Measurement of sensitivity of optical fibers for acoustic detection" wird beschrieben, daß der Kopplungskoeffizient um eine Größenordnung größer wird, wenn anstatt einer unbeschichteten Lichtleitfaser eine Faser verwendet wird, die aus einem mit Germanium dotierten Silikatkern mit einer Borsilikat-Phosphat-Umhüllung besteht und eine schützende Plastikeinhüllung aufweist. In dieser Veröffentlichung wird vermutet, daß die Plastikeinhüllung eine sehr viel höhere Poisson'sche Zahl und Kompressibilität als die Lichtleitfaser aufweist, wodurch die Anordnung sehr viel mehr als eine blanke Lichtleitfaser gestreckt wird und somit das Ansprechverhalten verbessert wird.

Ausgehend von einem derartigen bekannten Sensorelement ist es die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, dessen Ansprechempfind-



lichkeit noch weiter zu verbessern. Die Lösung dieser Aufgabe gelingt gemäß der im Anspruch 1 gekennzeichneten Erfindung. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind den Unteransprüchen entnehmbar.

Gemäß der vorliegenden Erfindung ist eine Lichtleitfaser-spirale in einen Block aus Material eingebettet, wobei dieses Einbettungsmaterial einen geringeren Elastizitätsmodul als das Lichtleitfasermaterial aufweist. Hierdurch wird die akustische Empfindlichkeit eines derartigen eine Lichtleitfaser aufweisenden akustischen Sensorelementes stark verbessert. Die Erfindung macht von dem Grundprinzip Gebrauch, daß das steifere Material, d.h. die Lichtleitfaser in diesem Fall die größere durch den Druck zugeführte Beanspruchung aufnimmt und dadurch tatsächlich stärker beansprucht wird als dies bei einer mit dem gleichen Druck beaufschlagten blanken Lichtleitfaser der Fall wäre. Durch die erhöhte Beanspruchung wird eine höhere Dehnung erzeugt und die Größe  $\Delta\phi/\Delta P_L$  und somit die akustische Empfindlichkeit übersteigt somit diejenige einer blanken Lichtleitfaser und auch diejenige einer einfach umhüllten Lichtleitfaser.

Anhand eines in den Figuren der beiliegenden Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispieles sei im folgenden die Erfindung näher erläutert. Es zeigen:

- Fig.1 ein bekanntes akustisches Sensorelement mit einer Lichtleitfaser O in einer Umhüllung J;
- Fig.2 ein akustisches Sensorelement gemäß der Erfindung in einer ersten Ausführungsform; und
- Fig.3 ein akustisches Sensorelement gemäß der Erfindung in einer zweiten Ausführungsform



Die Empfindlichkeit des akustischen Sensorelementes hängt von der druckinduzierten optischen Phasenverschiebung des die Lichtleitfaser durchlaufenden Lichtstrahles ab. Diese Phasenverschiebung beruht auf zwei Hauptursachen: der druckinduzierten Längenänderung der Lichtleitfaser und der Änderung des Brechungsindex der Lichtleitfaser. Die Längenänderung läßt sich einfach durch die Elastizitätstheorie beschreiben. Die Brechungsindexänderung ist durch den dehnungsoptischen Effekt vorgegeben und hängt sogar bei isotropem Material, wie beispielsweise Glas, sowohl von der axialen als auch von der transversalen Dehnungskomponente in der Lichtleitfaser ab.

In einer einem hydrostatischen Druck ausgesetzten blanken Lichtleitfaser sind die Beanspruchungen und Dehnungen in allen Richtungen einander gleich. Es stellt sich heraus, daß die Auswirkungen auf die Phasenverschiebung, hervorgerufen durch die Längenänderung, und durch die Brechungsindexänderung ein entgegengesetztes Vorzeichen bei einer etwa gleichen Größe aufweisen, so daß der Gesamteffekt geringer als jeder der durch die beiden Änderungen hervorgerufene Effekt ist.

Wenn eine Lichtleitfaser spirale in einen Block aus Material mit geringerem Elastizitätsmodul eingebettet wird, so werden die Beanspruchungen und Dehnungen in der Lichtleitfaser bedeutend verändert. Die radiale Beanspruchung ist etwas größer als im Falle der blanken Lichtleitfaser, wobei jedoch die Erhöhung der Beanspruchung den Faktor 2 nicht überschreitet. Wichtiger ist, daß die axiale Beanspruchung in großem Umfang in der eingebetteten Lichtleitfaser erhöht wird. Dies beruht darauf, daß in einer zusammengesetzten Struktur die steifere Komponente ( die Lichtleitfaser ) proportional mehr von der Gesamtlast aufnimmt und daß die gesamte axiale Last nunmehr durch den Druck mal dem Querschnitt der spiralförmig eingebetteten



-7-

Lichtleitfaser<sup>vorgegeben</sup> ist. Ein Großteil der axial der eingebetteten Lichtleitfaser zugeführten Druckkraft wird somit von dem Materialblock auf die Lichtleitfaser selbst übertragen, so daß die axiale Beanspruchung und die Längenänderung sehr viel größer als bei einer blanken Lichtleitfaser werden.

Diese erhöhte axial Beanspruchung und dementsprechend die hervorgerufene Längenänderung der eingebetteten Lichtleitfaser erhöhen eindeutig die druckinduzierte optische Phasenverschiebung und somit die akustische Empfindlichkeit. Es gibt jedoch noch einen zweiten Aspekt bezüglich der Erhöhung der Empfindlichkeit einer eingebetteten Lichtleitfaser. Da die Querbearbeitung der eingebetteten Lichtleitfaser nicht wesentlich erhöht wird, erhöht sich auch die Phasenverschiebung aufgrund der Brechungsindexänderung nicht so rasch wie dies aufgrund der Längenänderung geschieht. Die ausnutzbare optische Phasenverschiebung ist durch die Differenz zwischen den durch die Längenänderung und die Brechungsindexänderung hervorgerufenen Effekten gegeben, wobei sich bei einer eingebetteten Lichtleitfaser diese Differenz sehr viel schneller als die Längenänderung alleine erhöht.

Die Verbesserung in der Empfindlichkeit gegenüber der blanken Lichtleitfaser hängt von dem Verhältnis des Elastizitätsmoduls der Lichtleitfaser gegenüber dem Elastizitätsmodul des sie umgebenden Materials ab, und sie hängt ferner von dem Verhältnis der Beschichtungsstärke zu dem Radius der Lichtleitfaser ab. Je größer diese Verhältnisse gewählt werden, um so größer ist die Verbesserung hinsichtlich der akustischen Empfindlichkeit, obgleich beim Erreichen eines ausreichend hohen Wertes für das zweite Verhältnis durch eine weitere Steigerung dieses Verhältnisses kaum noch eine Erhöhung der Empfindlichkeit zu erzielen ist. Die Verbesserung der Empfindlichkeit hängt ebenfalls von





dem Wert der Poisson'schen Zahl für die Lichtleitfaser und das Einbettungsmaterial ab.

Gemäß Figur 2 ist ein Sensorelement 10 dargestellt, das eine optische Lichtleitfaser 11, beispielsweise erschmolzen aus Silikat, aufweist, wobei die Lichtleitfaser in einen Block 12 aus Material eingebettet ist, das gegenüber dem Lichtleitfasermaterial einen geringeren Elastizitätsmodul aufweist. Dieses Material mit geringerem Elastizitätsmodul kann ein warmhärtes oder thermoplastisches Material, wie beispielsweise Silikon-gummi, sein.

Berechnungen haben gezeigt, daß der maximale Anstieg der akustischen Empfindlichkeit durch die Verwendung eines Einbettungsmaterials mit einem geringen Elastizitätsmodul und mit einer geringen Poisson'schen Zahl erzielt werden kann. Das Material muß ebenfalls um die Lichtleitfaser herum gießbar sein. Obgleich Materialien mit geringem Elastizitätsmodul zu hohen Werten bezüglich der Poisson'schen Zahl neigen, sind viele Arten von weichplastischem Material in der Lage, eine große Erhöhung bezüglich der Empfindlichkeit zu erzeugen. Verschiedene Silikon-gummimischungen und eine weiche Polyurethanmischung sind benutzt worden, um eine Steigerung der Empfindlichkeit in der Größenordnung von 100 im Vergleich zu der blanken optischen Lichtleitfaser zu erzielen. Einige spezifische benutzte Materialien sind folgende: RTV 615- und RTV 602-Silikongummi von der Firma General Electric; die durchsichtige Ferris-Gießmischung der Firma Jewelers Aids Company; und PR-1574-Polyurethan der Firma Products Research and Chemical Corporation.

In einigen Anwendungsfällen wird das akustische Sensorelement einem hohen statischen Druck ausgesetzt. Unter diesen Umständen kann es nicht wünschenswert sein, das weichste Ein-



bettungsmaterial für eine maximale Erhöhung der akustischen Empfindlichkeit auszuwählen. Weiche Materialien mit einem geringen Elastizitätsmodul erfahren bei einem hohen statischen Druck eine große statische Dehnung, so daß auch die in das Material eingebettete Lichtleitfaser in hohem Maß gedehnt wird. Ferner verändern sich die elastischen Eigenschaften des Einbettungsmateriales bei großer Dehnung, wodurch die akustische Empfindlichkeit des Sensorelementes vermindert und das Ansprechverhalten in Abhängigkeit von dem statischen Druck nicht linear wird. Im Falle von hohem statischen Druck muß daher ein Kompromiß bezüglich des Einbettungsmateriales getroffen werden und es muß ein Material mit einem höheren Elastizitätsmodul gewählt werden, so daß der statische Druck einen geringeren Einfluss ausübt. Die akustische Empfindlichkeit wird dann geringer als bei einem weicheren Einbettungsmaterial, aber die Lichtleitfaser ist dann nicht so bruchempfindlich und das Ansprechverhalten des Sensorelementes hängt weniger von dem statischen Druck ab. Viele härtere thermoplastischen und warmhärtbaren Materialien, wie beispielsweise Epoxyde, Polystyren und Polytetrafluoräthylen sind in jenen Fällen geeignet.

Gemäß Figur 3 ist ein Sensorelement 20 dargestellt, bei dem eine Lichtleitfaser spirale 21 in einen Zylinder aus Material eingebettet ist, wobei das Zylindermaterial einen geringeren Elastizitätsmodul als das Lichtleitfasermaterial aufweist. Der Zylinder 22 besitzt einen hohlen Kern 23. Durch die Einbettung der spiralförmigen Lichtleitfaser 21 in die hohlzylindrische Struktur 22 mit geringerem Elastizitätsmodul läßt sich eine Erhöhung der Beanspruchung in einigen Richtungen und in einigen Teilen der Struktur erzielen, wenn diese einem isotropischen Druck ausgesetzt wird. Wenn beispielsweise ein Außendruck  $P$  einer dünnwandigen hohlen Kugel zugeführt wird, so kann die tangentielle Beanspruchung in der Kugelhülle beträchtlich größer als der Druck  $P$  sein. In gleicher Weise kann bei Zuführung



eines Druckes  $P$  von außen zu einem dünnwandigen hohlen Zylinder bei Verschließung der Enden dieses hohlen Zylinders durch Endplatten die axiale Beanspruchung in den Wänden sehr viel größer als der Druck  $P$  sein. Wenn bei einem derartigen Aufbau die Lichtleitfaser so eingebettet ist, daß sie vorherrschend in der Richtung der maximalen Beanspruchung verläuft, so kann die druckinduzierte axiale Beanspruchung und die daraus resultierende optische Phasenverschiebung in der Lichtleitfaser beträchtlich gegenüber dem Fall erhöht werden, wo die Lichtleitfaser in einen festen gleichförmigen Block aus dem gleichen elastischen Material eingebettet ist.

Bei einem solchen hohlen Aufbau aus einem Material mit geringerem Elastizitätsmodul kann ein erstes Ausführungsbeispiel eine relativ dünnwandige Hohlkugel aus dem Material mit geringem Elastizitätsmodul aufweisen, wobei die Lichtleitfaser in das Material eingebettet ist. Ein zweites Ausführungsbeispiel kann einen relativ dünnwandigen hohlen Zylinder aus elastischem Material umfassen, der an seinen Enden durch Endplatten 24, 25 verschlossen ist, wobei die Lichtleitfaser in dieses Material eingebettet ist und vorherrschend in Längsrichtung verläuft. Ein drittes Ausführungsbeispiel umfaßt den gleichen Hohlzylinder, wobei jedoch die Lichtleitfaser vorherrschend kreisförmig eingebettet ist.



-11-

Nummer: 30 47 308  
Int. Cl.<sup>3</sup>: G 01 L 1/24  
Anmeldetag: 16. Dezember 1980  
Offenlegungstag: 17. September 1981

1003059

3047308

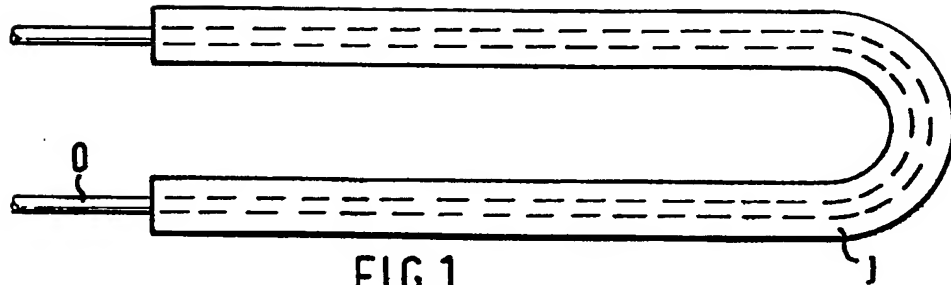


FIG. 1

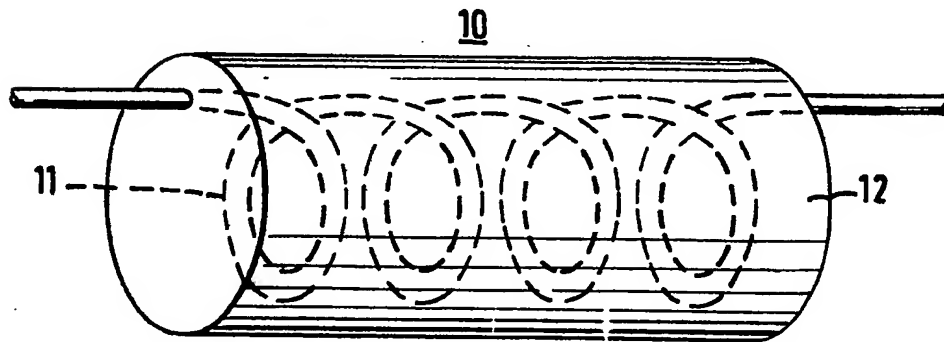


FIG. 2

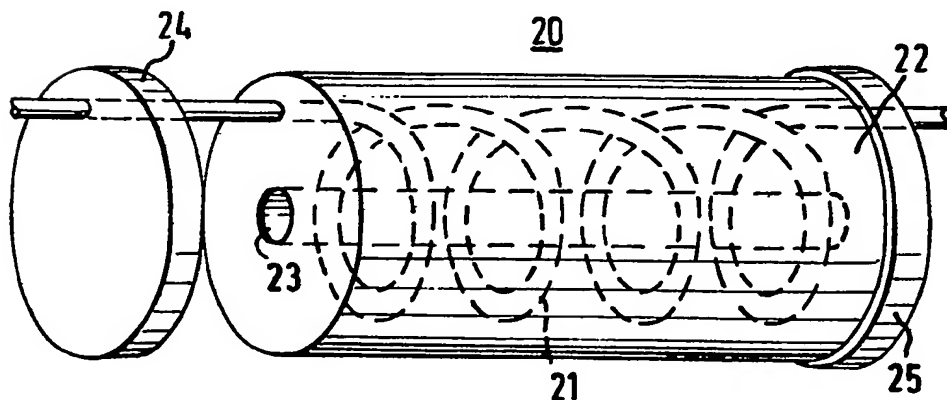


FIG. 3

130038/0736

Honeywell

